

学校编码: 10384

分类号__密级__

学号: 200430044

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

水声信道建模及其仿真平台的实现

Underwater Acoustic Channel Modeling And Simulation
Realization

欧晓丽

指导教师姓名: 程 恩 教授

专 业 名 称: 电路与系统

论文提交日期: 2007 年 月

论文答辩时间: 2007 年 月

学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: __

评阅人: __

2007 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：欧晓丽

2007 年 5 月 30 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密 (), 在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密 ()

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名: 欧晓丽 日期: 2007 年 5 月 30 日

导师签名: 程 恩 日期: 2007 年 5 月 30 日

摘 要

水声通信技术是研究和开发海洋的主要工具之一。水声信道的复杂性,如多途干扰等时变、频变、空变随机特性,使得水声通信技术成为当今最具挑战性的通信领域之一。同时,水声信道的高环境噪声、有限频带、传输时延大等特点又极大地降低了水声通信系统的可靠性、有效性。对水声信道进行研究,了解其特性,是设计水声通信系统的基础。

随着计算机技术日新月异的发展,目前应用计算机进行仿真研究已经渗透到各个技术领域。由于水声信道的复杂性,采用传统的手段设计适合浅海信道的通信系统既困难又不经济。而采用计算机仿真技术,则可以较好的对水声信道建模,同时也可以利用仿真事件的可重复性寻找对系统有重要影响的因素,甚至完美地模拟出真实的水声信道环境。

本文主要进行水声信道的建模与仿真的研究工作。

首先介绍了基于波动方程的五种建模技术,着重介绍射线理论模型的特点及其在声场环境模型处理中的应用可行性。接着分析了水声信道的主要特性以及浅海多途特性。阐述了射线传播理论,并在此基础上介绍了声线跨度模型和基于该模型的分层海洋中的本征声线的搜索算法,该算法能够快速而准确地搜索出重要的本征声线。接着,本文给出了水声信道的本征路径模型,从传播衰减和延迟、多径分量、多普勒频移几个方面用数学公式对本征路径信道进行了详细的理论分析,说明此信道模型的合理性和可行性。

最后,本文采用MATLAB建立仿真界面,对水声信道本征路径模型进行了仿真工作。并对仿真中输入的参数进行了一定的理论分析,对仿真所选参数给出了合理解释。从仿真结果中,说明了本征路径模型对水声的建模是合理正确的。

关键词: 水声信道; 本征声线; 建模仿真

Abstract

Underwater acoustic (UWA) communication technology is the primer tool to study and develop the ocean. The complexity of stochastic UWA channel's multi-path propagation with time-, frequency-, space-varying characters makes it one of the most challenging domain of communications nowadays. In addition, there are many other problems encountered in UWA channels such as larger ambient noise, much-limited bandwidth, and much-extended propagation latency, which severely reduce the reliabilities and validity of the UWA communication system.

With the rapid development of computer techniques, simulation research has infiltrated into every technology at present. Communication simulation, compared to conventional analysis methods such as analysis-by-circuit, has more advantages, and becomes a more popular tool to design and analyze communication systems. And it was also applied to UWA communication domains, especially to the UWA channel.

This article focuses on UWA channel modeling and simulation research. Firstly, five modeling techniques based on wave equation are introduced; especially the ray theory and its feasibility, as well as the characters of the UWA channel. Second, we explain the model of span, present an efficient algorithm for finding eigenrays in stratified ocean. In the next part, the eigenpath UWA Communication Channel model is discussed mainly. The channel model is analyzed theoretically in propagation attenuation and latency, multi-path components, and Doppler shift, so the reasonability and the feasibility of the model are verified.

In the last part, the simulating of the model and the interface with MATLAB is presented. At the same time, the input parameters in the model are explained in the physical background. Through the simulation, suitability of the model is tested.

Key Words: UWA channel; eigenrays; modeling and simulation

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究意义及选题背景	1
1.2 水声技术的发展现状	2
1.2.1 水声通信的发展现状	2
1.2.2 水声信道及其建模、仿真的研究现状	4
1.3 基本声学模型	5
1.3.1 波动方程	5
1.3.2 建模技术的分类	6
1.3.3 数值传播模型综述	7
1.3.4 射线模型在声场环境模型处理中的应用可行性	9
1.4 论文的主要内容和安排	10
第二章 水声信道的特性分析	11
2.1 海洋中的声速和声速结构	11
2.1.1 声速经验公式	11
2.1.2 海洋中声速的垂直分层性质和声速梯度	12
2.1.3 海洋中声速的基本结构	12
2.2 海洋中的声传播损失	13
2.2.1 扩展损失	13
2.2.2 衰减损失	14
2.2.3 界面引起的损失	14
2.3 海洋的环境噪声	16
2.4 浅海水声信道的多途特性	17
2.5 浅海水声信道的多普勒频移	20
第三章 基于射线模型的本征声线声场分析	22
3.1 射线声学的基本方程	22
3.1.1 射线声学基本方程	22
3.1.2 射线声学应用条件	23
3.2 分层介质中的射线声学	24
3.2.1 分层介质中的射线声场	24
3.2.2 分层介质中的声线	26
3.3 分层海洋中本征声线的求取方法	29

3.3.1 分层海洋中本征声线的声线跨度表示.....	30
3.3.2 本征声线搜索算法.....	32
3.4 本征声线的仿真结果	34
第四章 浅海水声信道本征路径模型.....	37
4.1 浅海声场的虚源表示式	37
4.1.1 硬底均匀浅海.....	37
4.1.2 一般均匀浅海.....	40
4.1.3 声线延迟和衰减.....	40
4.2 水声信道本征路径模型	41
4.3 水声信道本征路径模型实现的理论分析	44
4.3.1 信道的多普勒频移.....	44
4.3.2 信道的多径分量.....	45
第五章 本征路径模型信道仿真	50
5.1 仿真界面和实现流程图	50
5.2 仿真输入参数分析	51
5.2.1 输入信号的选择.....	51
5.2.2 传播时延和传播衰减.....	52
5.2.3 本征路径数目和多径分量数目.....	52
5.2.4 环境噪声.....	53
5.2.5 信道的多普勒频移.....	53
5.3 MATLAB 仿真结果分析	53
第六章 总结与展望.....	63
参考文献.....	65

Contents

Chapter 1 Preface.....	1
1.1 Background and meaning	1
1.2 The current situation of UWA technology	2
1.2.1 Current situation of UWAcommunication	2
1.2.2 UWA channel modeling and simulation	4
1.3 Basic acoustic models	5
1.3.1 Wave equation.....	5
1.3.2 Categories of modeling technology	6
1.3.3 Summary of transmission models.....	8
1.3.4 Feasibility of ray model	9
1.4 Main content	10
Chapter 2 Character of underwater acoustic channel.....	11
2.1 Sound velocity in the ocean.....	11
2.1.1 Experiential formula	11
2.1.2 Sound velocity gradient	12
2.1.3 Basic structure of sound velocity	12
2.2 Sound transmission loss in the ocean.....	13
2.2.1 Spreading loss	13
2.2.2 Attenuation loss	14
2.2.3 Interface loss	14
2.3 Ambient noise in the ocean	17
2.4 Multipath propagation of shallow-water acoustic channel.....	17
2.5 Doppler frequency shift of shallow-water acoustic channel	20
Chapter 3 Analysis of eigenray model.....	22
3.1 Basic equation of radial acoustics	22
3.1.1 Basic equation.....	22
3.1.2 Application range.....	23
3.2 Radial acoustics in stratified ocean.....	24
3.2.1 Radial sound field	24
3.2.2 Sound ray	26
3.3 Methods of seeking eigenrays in stratified ocean	29

3.3.1 Model of span	30
3.3.2 Methods of seeking eigenrays.....	32
3.4 Simulation results.....	34
Chapter 4 The eigenpath model of shallow-water acoustic channel..	37
4.1 Virtual sound origin.....	37
4.1.1 Uniform shallow-water of hardground.....	37
4.1.2 Uniform shallow-water	40
4.1.3 Propagation attenuation and latency	40
4.2 The eigenpath modeling	41
4.3 Theoretic analysis of the model.....	44
4.3.1 Doppler shift	44
4.3.2 Multi-path components	45
Chapter 5 Simulation of eigenpath model.....	50
5.1 Simulation interface and flow chart.....	50
5.2 Analysis of input parameters	51
5.2.1 Input signal.....	51
5.2.2 Propagation attenuation and latency	52
5.2.3 Numbers of eigenpath and multi-path components	52
5.2.4 Ambient noise	53
5.2.5 Doppler shift	53
5.3 Analysis of the simulation results	53
Chapter 6 Conclusion and prospect.....	63
References.....	65

第一章 绪论

1.1 研究意义及选题背景

海洋是人类生存活动十分重要的领域,随着人类文明的进一步发展,人类对资源的消费急剧增长,要维持人类的进一步发展,就必须了解、开发和利用海洋资源。海啸的准确预警,资源开发方面的海底石油勘探和开采,以及与国家安全有关的多种监控等等都要求现代的通信系统是:陆—海—空三维空间移动互联通信网。三维移动互联通信网的组成,当前主要制约于水下通信^[1]。而水下通信的难点和特点集中在其复杂的海洋水声信道上。信道的复杂性使得传输信号产生强烈的幅度起伏和相位波动。因而从通信的观点出发,分析水声信道的传播特性对于水声通信的研究具有重大意义。

在科学研究中,由于仪器和设备使用费用高,进行实验测量一般开支很大。在进行海洋学和水声学数据采集时,情况更是如此,因为其所使用平台的(舰船、飞机、潜艇)代价更高昂。目前,仿真模拟方法已经广泛应用于各门学科,它无需耗费过度的资源进行额外的现场观测,并可进一步帮助提高科学认识。因此在水声领域中,也大都利用典型的现场测量的结果来检验所建立的模型,依据经验模型的理论来预报声场。另外,科学工作者也逐渐注意到物理方法与计算机之间的联系,并且发觉以计算的结果来认识这个世界是很有用的。因此,计算机仿真有时被视为科学的第三种形式,位于理论与实验之间的中间形式^[2]。

海洋环境仿真(Simulation of the Oceanic Surroundings)在国外又称水声建模(Underwater Acoustic Modeling),是指对海洋中水声环境特性、基本水声理论和声呐性能进行仿真模拟,建立水声物理模型或数学模型,特别是把水声物理知识转变为可用计算机处理的软件包,为声场预报和计算机辅助设计建立实用水声模型。

在海洋中,声场及其信号的处理面临着三要素:一是声源,二是传播介质,三是空间分布的传感器阵(垂直或水平或其他阵形)。故海洋环境仿真问题将涉及到三大类模型的仿真建模:环境模型、基本声学模型和声呐性能模型。

海洋环境模型包含许多经验算法,它们定量地表示海洋环境的边界条件(海面和海底)以及介质效应。这类模型包括声速、吸收系数、海面和海底反射损失

以及海面、海底和体积反向散射强度。

基本声学模型由传播(传播损失)、噪声和混响模型组成。

声呐性能模型由环境模型、基本声学模型和适当的信号处理模型组成,用以求解特定的声呐应用问题,诸如潜艇探测、猎雷、鱼雷自导和海洋测深等。

本文将对海洋的环境模型和基本声学模型做初步的探讨,并在此基础上采用射线声场理论模型进行水声信道建模及其仿真的研究。

1.2 水声技术的发展现状

众所周知,水下无线通信大多是通过声波来传送信息。这是因为,无线电波要想在海水中传播较大的距离,就必须具有极低的频率(30-300Hz),而这需要很长的天线和很高的传输能量,通常是不可实现的。而光波则受散射影响过大,能克服散射影响的窄激光传输目前还在研究当中。相比之下,声波在水中的传播性能就好得多。例如,利用深海声道效应,人们甚至远在五千公里以外,也能清晰地收到几磅 TNT 炸药爆炸时所辐射的声信号。正是由于上述原因,使得水声技术在人类的海洋活动中得到了广泛的应用,而且随着人类对海洋的需求日益增加,水声技术的应用也必将更加广泛。

1.2.1 水声通信的发展现状

水声通信的历史可以追溯到 1914 年,水声电报系统研制成功并被英国海军安装在巡洋舰上,这可以看作是水下无线通信的雏形。真正有可靠性保证的水声模拟通信系统出现在二战以后,系统采用了调制技术,用于潜艇间的通信。但由于技术条件等的限制,从六十年代开始的很长一段时间内,水声通信技术没有得到进一步的发展。进入七十年代后,水声通信进入了一个相对迅速发展的阶段。在军事领域,随着探测区域从沿海大陆架延伸到深水区,以及探测距离和精度的提高,要求信息传输系统能够实现远距离高速传输。水下武器系统的日益智能化,则要求对其进行相应的指挥和控制。对水下航行器和探测器的监测和导航使得水下通信技术的研究得到了人们的高度重视。在经济领域,随着海洋开发和渔业资源的探测和开发、海洋钻井平台和舰船的应急维护、水下资源勘探、海底地貌和地震图像传输、海洋环境监测、海上科学考察、水下机器人导航等的发展,对水

声通信技术也不断提出新的要求。现在的水声通信系统运用于各种各样的场合，它们可以在一系列海洋作业里替代潜水员，另外在深海中它们是完成任务的唯一的方式。从几千米深的海底进行高质量的视频传输现在已经实现，声遥感的水下网络也正在研制当中。如果能够研制出更高效的水声通信系统，它们的应用范围将会进一步扩大。现在正在研究的许多应用中，例如一般所说的潜艇和水面舰船的“实时通信”中，不仅有点到点的通信连接，还包含网络结构。

水声信道由多径效应引起的信号衰落现象很普遍，另外信道条件的时空变化较大，因此通过水声信道来进行数据传输与通过其它媒质进行传输有很大差异。现代高速数据传输系统的设计通常与对海洋声场和通信工程的研究结合起来，这种研究的目的是将许多已成熟的无线电波通信原理结合起来并将它们重新运用于水声信道当中。然而，水下环境对数字声信号产生的不利的影响需要发展新的特别的通信技术，现在已经提出了许多解决方案，进行了广泛研究并确立了水下声通信作为一个新的工程应用领域的地位^[3]。

在这一领域的研究工作中，已经有许多重要的进展。为了有效的减少多径效应带来的影响，通常采用以下两大类策略：一类是针对信号进行特别的设计和处理来抑制多径干扰，另一类是采用指向性好的发射器和接收器阵列。在时间扩展严重的多径信道中，为了达到高速数据率，一些信号设计的方法集中在采用多重频移键控(MFSK)技术上，在相同频率的相邻脉冲之间插入守护时间，以保证下一个脉冲收到之前，前一个脉冲引起的回响信号已经消亡。对于由信道本身以及发射器、接收器的运动导致的相位不稳定，一般采用非连续或差分连续相位解调。近年来，扩频技术被用来解决和对抗多径现象。为了从接收信号中获得主要的多径分量，可以采用RAKE接收机来将所有多径分量进行重新结合。另外，带宽效率很高的相位连续通信如相移键控方法(PSK)，在过去通常被认为是不可行的，现在被证明是一种有效可行的高速数据传输方法。它在许多种水下信道中得到应用，包括时间扩展很严重的水平浅水信道。新一代的基于连续相位探测技术原理的水下声通信系统，能够达到比现有基于非连续相位探测方法的系统高得多的数据输出率。作为一种很好的替换，出现了一类新的基于有效的均衡方法的实用系统。前面提到的采用守护时间的信号设计方法和扩频技术都要牺牲有效带宽来减少码间干扰，而均衡方法可以提供高效带宽通信。新一代的高速水下通信系统将

基于多径均衡方法,此外,时延差编码等新技术也开始应用于水声通信,并且在不断的研究和进展当中^[3]。

在水声通信技术快速发展的同时,其它领域的技术,尤其是电信、电子和计算机技术以更为迅猛的速度日新月异地前进,这极大地促进和支持了水声通信技术的发展。所以最近十多年来,水声通信技术发生了深刻的变化,面貌焕然一新。也正是这一阶段,水声通信的研究方法、实现方式以及硬件设备等都产生了根本性的变化。近年来,世界各国的许多院校和科研结构,如:美国的麻省理工学院、伍兹豪海洋研究所(WHIG)、华盛顿大学、Datasonics 公司、Delphi 通信系统、海军指挥控制和海洋监测中心 RDT&E 分部、英国的拉夫堡理工大学、国家海洋研究所 NIO 等相继对水声通信技术展开了研究,并取得了丰硕的成果。国内的中科院声学所、哈尔滨工程大学和西北工业大学以及厦门大学等单位进行了水声信道数据传输的研究。

1.2.2 水声信道及其建模、仿真的研究现状

作为水声信息传输通道的海洋介质是复杂多变的,有随机起伏的软表面,表面附近有气泡层,介质当中有些分散的或密集的非均匀散射体,如鱼群、浮游生物等。此外,还存在不同尺寸的冷暖水团、层流、湍流、内波等。水声信道是一个非常复杂的时变、空变、频变信道。传播损失,多径效应,频散效应,水中的不均匀性,边界的不平整等等,均会引起不同类型的畸变,从而使信号处理的工作复杂化,并且降低整个水声通信系统的性能。正是水声信道的这种复杂性、多变性,决定了水声信道的研究工作是困难而丰富的。

基于声呐的水下通信无一例外的都要以水声信道的研究成果作为其坚实的基础。目前在水声信道的研究方面已经取得的一些研究成果包括混合层声道传播规律, SOFAR 声道中的会聚带效应,深海海底反射性能研究等等。因此,要想使先进的水声信号处理手段达到预期的较为理想的效果,必须深入掌握水声信道对水声信号产生的衰减、畸变和起伏等影响,以达到信道匹配。

计算机仿真是一门利用随机数实验求解随机过程的方法。利用计算机仿真可以多次重复虚拟客观世界的同一现象,从而找出其内在的发展规律。尤其对含有随机变量和随机过程、难以建立解析数学模型的客观事物的研究,计算机仿真研

究方法具有不可替代的优点。并且随着通信系统复杂性的增加,人们对通信系统可靠性、有效性要求的提高,传统的手工分析与电路板实验等分析方法已经不能适应,通信系统计算机模拟仿真技术日益显现出其巨大的优越性,并成为当今国内外通信系统与关键技术研究开发的重要技术手段之一,也是技术发展状况的重要标志^[4]。

目前,仿真技术已发展成为通信系统工程中重要的设计和分析工具,也引起越来越多的水声通信领域研究人员的重视。水声通信仿真研究已经成为未来水声通信系统研究的重要方向之一,尤其是关于水声信道仿真。由于水声信道的复杂性,采用传统的手段设计适合浅海信道的高速通信系统既困难又不经济。而通过采用计算机仿真技术,则可以较好地对水声信道建模,同时也可以利用仿真事件的可重复性寻找对系统有重要影响的因素,甚至完美地模拟出真实的水声信道环境。可见,采用仿真技术,不仅可以在水声通信系统设计前对算法进行研究,检验算法的有效性、适用性,而且在水声通信系统设计时可以灵活采用不同参数进行系统优化。同时也大大提高了系统设计的速度,降低了实际实验的成本。

通常使用水声信道建模、仿真的目的是评价水声信号处理算法以及增加水声技术系统现场试验成功的概率。随之而得到发展的水声信道建模技术也越来越多,目前已经有模型分解法、抛物线方程法、波数积分算法、有限差分法等等。而且,这些建模技术大都基于声传播的射线理论。

总之,水声信道建模、仿真是很重要的研究领域,很多方面都有待增加研究。

1.3 基本声学模型

1.3.1 波动方程

波动方程是从基本的状态方程、连续方程和运动方程导出。在很多物理学基础教科书中都有严格的推导。本文将直接从波动方程出发,进行数学研究。

通常,建立声传播模型的公式是从与时间有关的三维波动方程入手的。波动方程的具体形式随基本前提假设和具体应用场合的不同而不同。对于大多数的应用,通常都采用简化的与时间有关的双曲型二阶线性偏微分方程:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (1-1)$$

式中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ，是拉普拉斯算子， Φ 是势函数， c 是声速， t 是时间。

为了获得时间无关的亥姆霍兹 (Helmholtz) 方程，又进行了进一步的简化，引入了谐和解 (对单频连续波而言)。具体而言，就是假定势函数 Φ 的谐和解是：

$$\Phi = \phi e^{-i\omega t} \quad (1-2)$$

式中 ϕ 是与时间无关的势函数， ω 是声源频率 ($2\pi f$)。于是，波动方程 (1-1) 就简化成：

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (1-3)$$

式中 $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ 是波数， λ 是波长。在柱坐标中，可得：

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2(z) \phi = 0 \quad (1-4)$$

亥姆霍兹 (Helmholtz) 方程 (1-3) 被称为与时间无关的 (或频域) 波动方程。在柱坐标中，方程 (1-4) 通常被称作简化的椭圆形波动方程。

有很多理论方法适用于解亥姆霍兹 (Helmholtz) 方程，具体适用哪种方法依赖于对环境的具体几何假设和对 ϕ 的解的选取类型。为了有效地说明各种方法的不同，根据波动方程的五种规范解列出了分类框图，这五种规范分别为射线理论、简正波、多路径展开、快速声场和抛物型方程技术。参考文献 [2] 对这五种模型做了很详细的介绍，这里不再赘述。

1.3.2 建模技术的分类

虽然声传播模型可以按照所用的理论方法进行分类，但因各种理论方法相互存在交叉，要进行严格分类就很困难。结果是分类方案分得越细，出现相互交叉就越多。在这里，我们利用五种规范的波动方程解所对应的五种理论方法构成了一个概括的模型分类表 (Jensen&Krol,1975; Dinapoli&Deavenport,1979; Weston&Rowlands,1979)^[2]。

在这五类模型中，还可进一步细分为与距离无关的类型和与距离有关的类型。与距离无关，意味着假定了模型对环境是圆柱对称的 (即海洋环境是水平分

层的，它的特性仅随深度变化)。与距离有关，是指海洋介质的某些特性除与深度(z)有关以外，还与相对接收器的距离(r)和方位(θ)有关。这种随距离变化的特性通常包括声速和海洋深度，尽管诸如海况、吸收和海底底质等其他参数也可随距离变化。与距离有关，还可进一步分成为在距离和深度上有变化的二维(2D)情况，或在距离、深度和方位上有变化的三维(3D)情况。

为了说明解波动方程所使用的五种方法之间的关系，我们将采用 Jensen 和 Kroil (1975 年) 给出的一个比较精细的表(稍有修改，图 1-1)。根据这一分类表，有三种途径把五种应用与水声传播建模技术联系起来。图 1-1 将作为一个很有用的检索图。

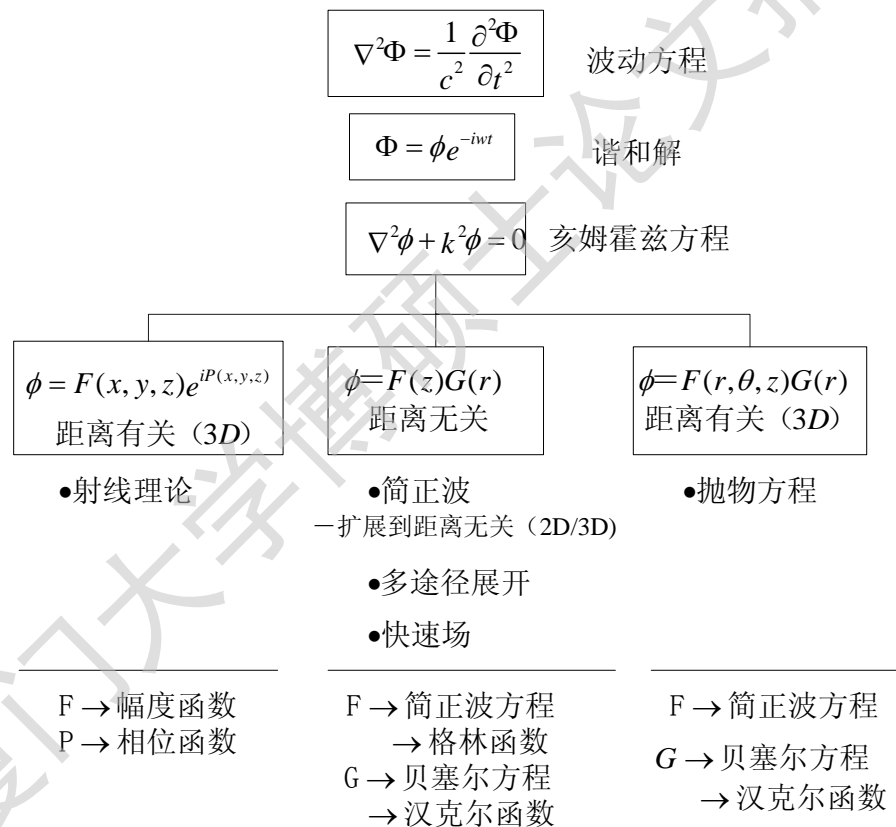


图 1-1 传播建模理论方法之间的关系概要

1.3.3 数值传播模型综述

为了更好地利用现有资料，特将模型整理归类。我们知道，海洋中声传播的各种物理模型和数学模型在实用性上都有其固有的限制。这些限制通常表现为频

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库